

半溶融金属の塑性加工の特長

The Characteristics of Plastic Working of Half-Molten Metal

福岡 新五郎*

Shingoro FUKUOKA

半溶融状態（固液共存状態）における金属加工の一例として筆者らが行ってきた押し加工に関し、その長所と限界を実験結果にもとづいて述べる。また半溶融状態の金属の変形挙動についても新たな知見を得たので報告する。

1. はじめに

種々の金属加工法のうちで、熱間の塑性加工はその変形抵抗が温度上昇とともに低下するという金属の性質を利用している。これまでの研究で固相線を超えた温度域における半溶融状態ではさらに変形抵抗は小さく、この性質を加工に利用すればユニークな加工法をもたらすとともに製品品質も今までにない長所がえられることが分った。とくに次の4点が明らかになった。

- 1) 固相分率（固液共存状態において固相部分の全体に占める比率）が100%から75~80%に減少するに伴い変形抵抗は $\frac{1}{4}$ ~ $\frac{1}{2}$ に低下する。
- 2) 半溶融押し加工では押し力は固相分率の減少とともに減少するが、その減少率は単軸圧縮試験で求められた変形抵抗の減少率ほど大きくない。
- 3) ダイス角 60° ~ 180° の範囲では押し力はダイス角の影響をうけない。
- 4) 棒状製品において横われが生じることがある。

実際の塑性加工へ発展させるためには半溶融金属の挙動について明らかにすべき問題点がまだ多い。

この観点から半溶融金属の挙動についてカムプラストメータによる圧縮実験によって圧縮変形抵抗を求め、更にそのひずみ速度依存性を求めた。また実際の加工に関する研究として、ダイス角・ベアリング長さ等の押し条件と押し力・製品性状の関係について押し実験を行った。

材質は圧縮試験ではアルミ-銅合金を用い、押し実験ではアルミニウム-銅合金・黄銅・銀ろうを用いた。

2. 圧縮試験

2.1 実験方法および装置

実験に用いたカムプラストメータはひずみ速度が 0.2 sec^{-1} から 50 sec^{-1} まで可変の圧縮試験機である。この実験では 0.2 sec^{-1} 、 1.5 sec^{-1} 、 10 sec^{-1} の3種類のひ

ずみ速度を用いた。

実験に用いた合金はアルミニウム-5.7%銅であって、金型鋳造後機械仕上げして所定の寸法の試験片とした。

試験片寸法は3種類で、外径26mm・高さ12mm, 18mm, 23.5mmである。

実験の手順は次のようである。

試験片はサブプレス（外径120mm, 高さ100mmのステンレス鋼製）の中心にセットしたのち電気炉で加熱される。試験片の温度が所定の温度に達するとその後約20分間同一温度に保持され、その後電気炉からとり出してカムプラストメータにのせ直ちに圧縮試験を行う。

電気炉は温度コントロールを施してあり、サブプレスの熱容量は大きいので、炉からとり出すことによる温度低下は無視できる程度のものである。実験中も試験片等の温度は熱電対によって記録される。圧縮過程で測定されるのは荷重と変位で、それぞれロードセルと差動トランスによって検出される。

2.2 実験結果および考察

(1) 固相分率、応力、ひずみの計算 半溶融試験片の固相分率は合金の状態図と試験温度から得られる。

平均圧縮応力は試験片の体積一定、形状が円柱のままであることを仮定して計算される。

ひずみは平均対数ひずみとして計算される。

(2) 応力-ひずみ曲線 図1(a)~(f)は試験片高さ23.5mmの場合の応力-ひずみ曲線である。図1(a)~(c)はひずみ速度によって整理してあり、図1(d)~(f)は固相分率で整理してある。図1(a)には従来の熱間加工温度範囲に対応する温度領域における曲線も固相分率100% ($\phi^*=100\%$)として半溶融状態との比較のために示してある。

これらの図から次の3点が読みとれる。

1) 固相分率100%（すなわち固相線上の温度において）の変形抵抗と比較して変形抵抗は固相分率の減少とともに非常に小さくなる。

2) 固相分率又はひずみの速度の減少とともに、変形の初期段階における変形抵抗の増加率は極めて小さくなる。

3) ひずみ速度が 0.2 sec^{-1} から 10 sec^{-1} に増加する

*東京大学生産技術研究所 第2部
現在古河電気工業（株）中央研究所

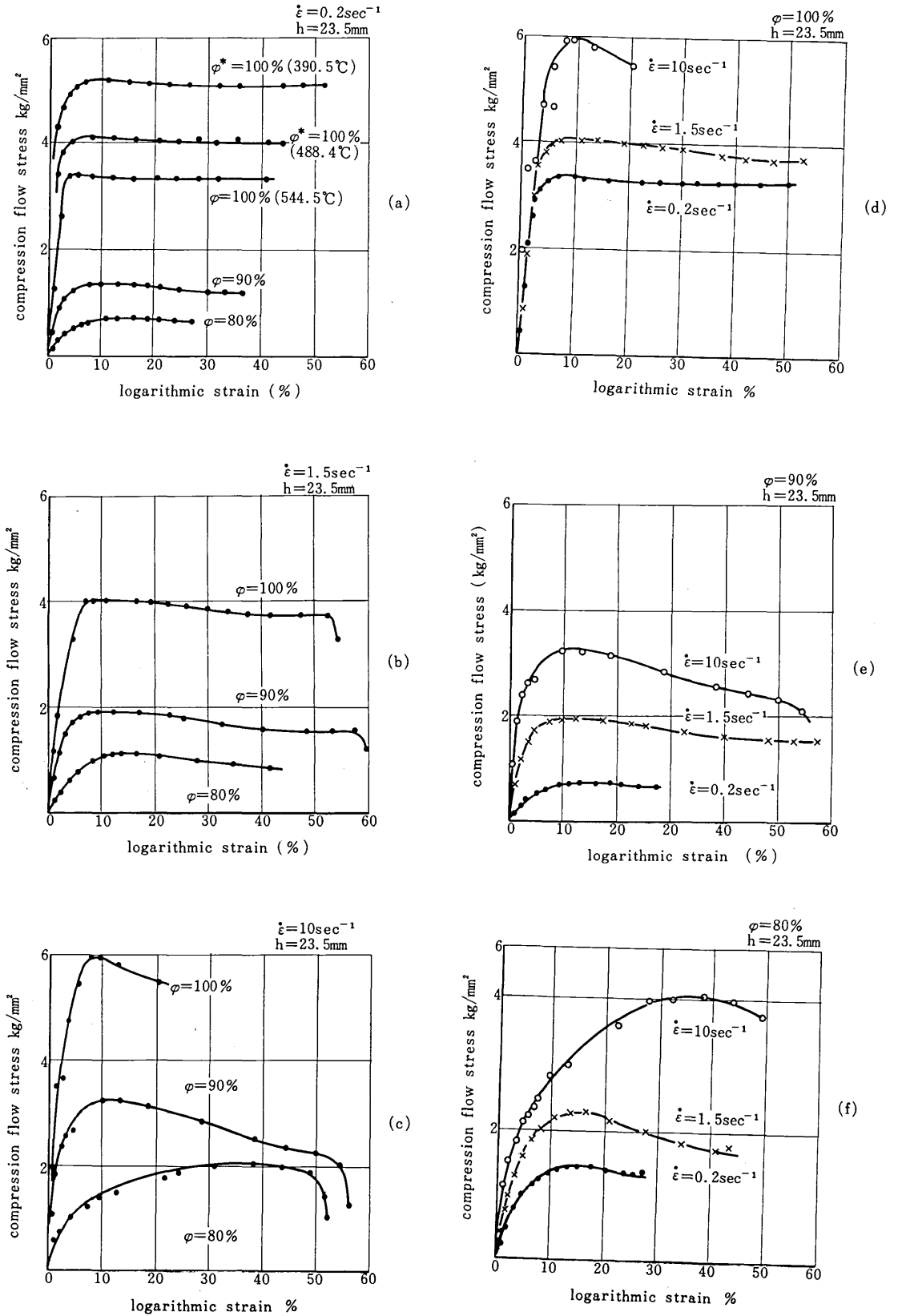


Fig. 1 Stress-strain curves in uniaxial compression tests

にもない応力-ひずみ曲線にはっきりしたピークが生じる。またピークにおけるひずみは固相分率が小さいほど大きい。

これらの結果について次のように考察することができる。

一般に固相線以上に加熱された材料中には液相成分が生じる。この液相成分は結晶粒界に存在するので結晶粒相互間のスリップが容易になり各結晶粒の変形に対する結晶粒相互の拘束が緩和される。液相成分が増すと、各粒の回転に対する拘束も緩和される。

粒界でのスリップ、各粒の変形および回転が容易になると、材料全体の変形が起りやすくなる。このようにして固相分率の減少に伴う変形抵抗の低下が生じる。さらに、固相分率・ひずみ速度が小さいほど粒界における液相成分は流動しやすい、すなわち上述の拘束は緩和されやすい。したがって変形抵抗は一層小さくなる。このような変形抵抗の低下に伴って、応力-ひずみ線図の初期段階における変形抵抗の増加率が低下するようになる。

応力-ひずみ線図にピークの生じる現象は二つの現象に分けて考えるべきである。一つは固相線以下の温度における通常の加工硬化に相当するひずみの増加にともなう応力の増加であり、他はピーク後の応力の減少である。固相分率 100% において加工硬化が全く見られないことから (図 1 a), 固相分率 100% 以下におけるひずみの増加に伴う応力の増加が固相成分のいわゆる加工硬化でないことは明らかである。この現象は次の二つの原因によるものと考えられる。

- 1) 液相成分が粒界間隙にとじこめられることによる上記拘束の増加
- 2) 材料全体の変形に占める固相成分 (結晶粒) の変形割合の増加

前回の実験データから判断すると固液共存状態における合金の固相成分だけの変形抵抗は、材料全体の变形抵抗の数倍と考えられる。それにもかかわらず小さい応力で各結晶粒のわずかな変形によって材料全体が大きく変形しうるのは、液相成分の存在が結晶粒のすべり、変形、回転に対する拘束を緩和するためである。しかし材料全体の変形が進むとすべりあるいは回転できる粒の数は減少し、ついには結晶粒自体の変形なしではもはや変形は生じえない状態となる。結晶粒自体が変形するようになると、液相成分が存在する各粒界間隙は形と容積を変え、液相成分の流動を著しく困難なものとし、部分的には全く不可能にしその間隙にとじこめてしまうことも起る。このような状態では上記の拘束はずっと大きなものとなるので材料全体の変形は一層難しくなり同時に固相成分の変形が全体の変形に占める割合が増加する。かくして上述の 2 原因から加工硬化に一見類似して本質的には全く異なる応力の増

大が生じる。

ピーク後の応力の低下については次のように考察することができる。

単軸圧縮では試料の側面は拘束されていないので、材料全体の変形が十分大きくなると外表面に近い部分における液相成分の流出が起る場合がある。固相分率における液相成分の流出は著しくなる。この流出が発生すると、流出を開始した液相成分および流出後の粒界間隙の負荷能力の低減によりこの領域の変形抵抗の低下、したがって材料全体の平均変形抵抗の低下を来たす。このため応力-ひずみの線図において、ひずみとともに増大してきた変形抵抗は極大値を示し、さらにひずみが増大すると逆に徐々に減少する結果となる。ただし、ひずみ速度が大きい場合はこのほかに変形仕事による熱発生に起因する固相分率の低下および材料の破損が加わるため極大値以後の応力低下が著しいものと考えられる。この変形熱の発生に伴う固相分率の低下の効果については、固相分率 90% の場合より固相分率の低下による変形抵抗の低下率の激しい固相分率 100% の場合の方が、あるいはひずみ速度 1.5 sec^{-1} より 10 sec^{-1} の方が、この変形抵抗の落ち込みの激しいことによっても裏付けられているといえる。

ひずみ速度 10 sec^{-1} 、固相分率 80% の場合は初めから液相成分が多いため液相の初期流動が容易で固相成分の変形が全体の変形の中で大きな割合を占めるまで相当大きなひずみを生じ、その後液相成分の急激な流出による応力の低下が生じるものと考えられる。

(3) 変形抵抗と固相分率の関係

図 2 (a), 図 2 (b) はひずみ 4%, 10% における結果をそれぞれに示したものである。これらの曲線は指数函数的変化を示しているので、片対数グラフに表わしたものが図 3 (a), 3 (b) である。さらに変形抵抗を固相分率 100% の値で無次元化したものが図 4 (a), 4 (b) である。ほぼ一本の直線で近似されることが分る。

図 4 (a) における一点鎖線は前回データの鉛-錫合金の場合を示しており、これがひずみ 4%, ひずみ速度 0.2 sec^{-1} におけるアルミニウム-銅合金の場合の結果と完全に一致していることは、固液共存状態における両合金の変形に関してそれぞれにおける液相成分が同様の挙動を示すことを再び示唆している。また前項で考察したような液相成分の挙動・作用を仮定すれば、これは個々の合金によって異なる性質のものではないから、一般的に固液共存状態における金属の変形抵抗と固相分率の関係は図 4 (a), 4 (b) で示されるように、変形抵抗が固相分率の指数関数で表わされる可能性があるといえる。

(4) ひずみ速度の影響

図 5 (a), 5 (b) はひずみ 4% および 10% における変形抵抗とひずみ速度の関係を示したものである。

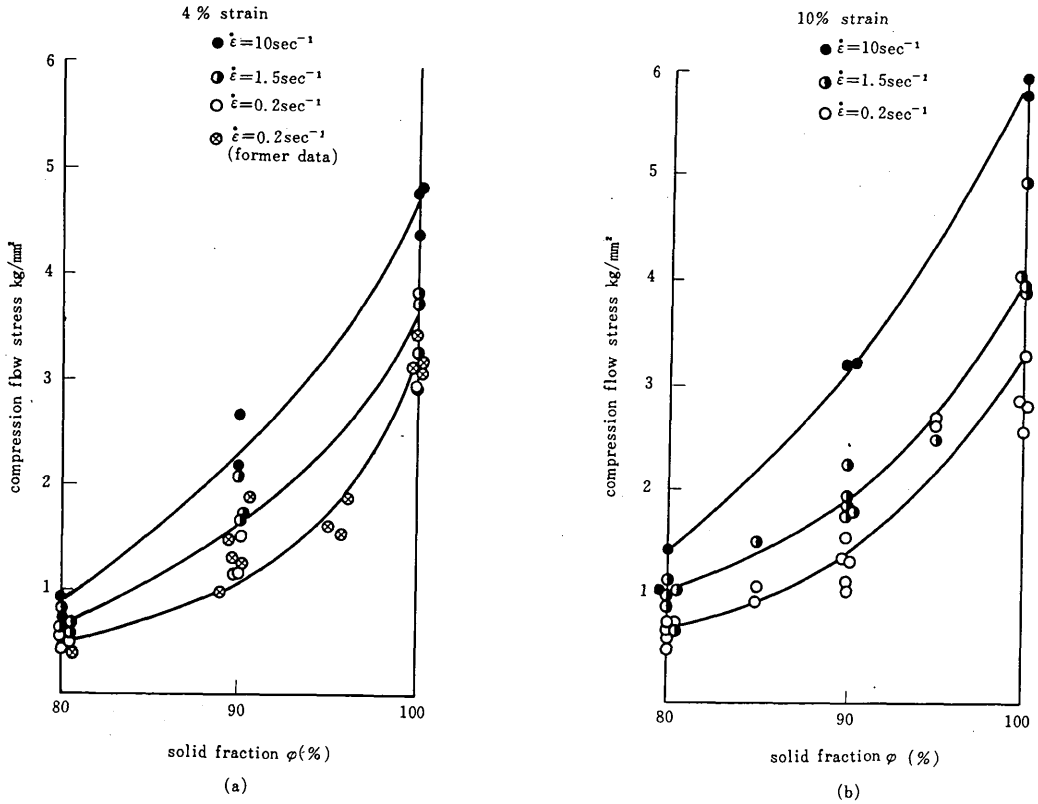


Fig. 2 The relationship between flow stress and solid fraction

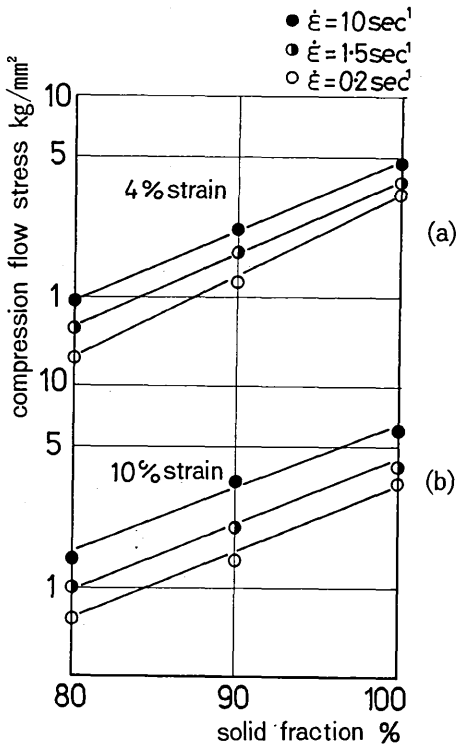


Fig. 3 Flow stress vs solid fraction

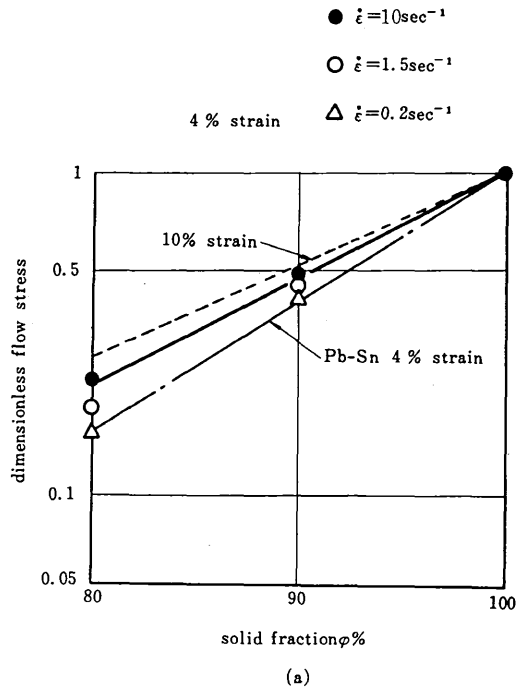


Fig. 4 The relationship between dimensionless flow stress and solid fraction

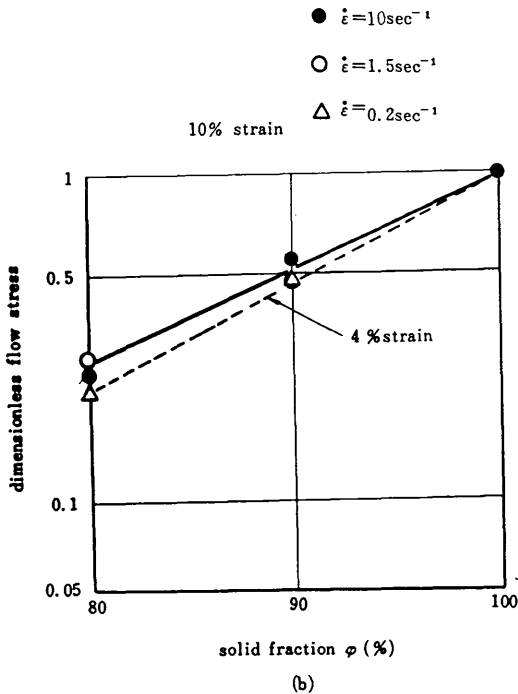


Fig. 4 The relationship between dimensionless flow stress and solid fraction

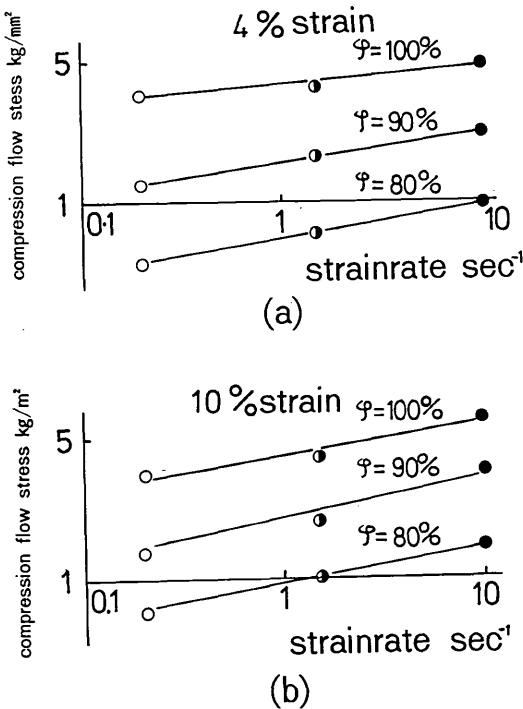


Fig. 5 Flow stress vs strain rate

このように変形抵抗がひずみ速度とともに増加するのは、結晶粒の相対すべり・変形・回転に対する拘束の増大によるものと考えられる。

(5) 試験片寸法・形状の影響

図6(a)~(c)は試験片寸法について整理した応力-ひずみ線図を示す。固相分率100%で寸法の影響が全くなく、90%, 80%で影響が出ていることは寸法による液相成分の挙動の差が変形抵抗に影響していることを示している。

とくに固相分率80%, 試験片高さ12mmの場合(図6, c)と図1(f)の固相分率80%・ひずみ速度10sec⁻¹の場合の応力-ひずみ線図が非常に似た曲線となっていることは、両条件における液相成分の挙動が類似しており、ともに液相成分の材料外への流出がおこりにくく変形末期まで内部に保持される傾向があることに起因するものと考えられる。

3. 押し出し試験

3.1 実験装置および方法

(1) 試料 試料の組成はアルミ-5.7%銅, 黄銅(Cu-32.5%Zn), 銀ろう(Ag-30%Cu-25%Zn)である。試料は金型铸造後旋盤加工によって所定の寸法・形状(外径40φ, 平行部長さ25mmで円錐ダイス用にはノーズをつけてある)に仕上げられた。

(2) 押し出し装置 押し出し装置は型締用のサブジャッキのついた横型圧液試験機で, 最大荷重100 ton, 最高ラム速度70mm/minである。付属の加熱炉は高周波誘導炉で容量30KW, 最高温度は1,500℃である。

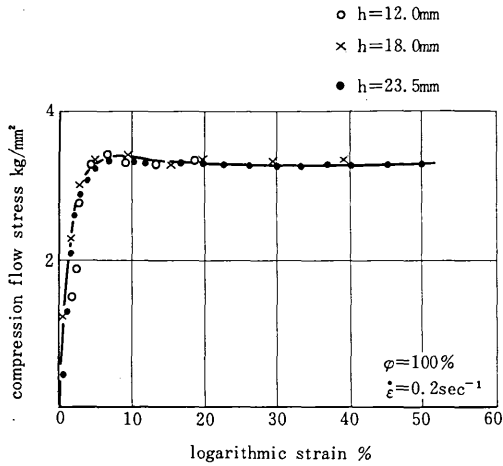
(3) 工具 ダイスは穴径10mm, 4mm, 2mm, ダイス角は30°, 60°, 180°である。ベアリング長さは180°ダイスについて穴径に対する比を0, 0.6, 1, 2, 5とした。ポンチは外径40mm, 長さ70mmとし, 管材の押し出し用には穴径10mmのダイスを用い, 径8mm, 9mmのマンドレルつきポンチを用いた。

(4) 実験方法 試料温度を所定の値に上昇させたのち一定時間保持し, サブジャッキで型締め力を加え直ちに押し出し荷重を付加した。実験中の荷重はロードセル, 変位はポテンシオメータで検出した。

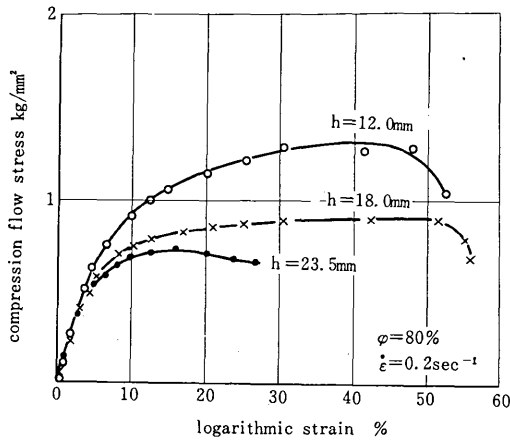
3.2 実験結果および考察

(1) 押し出し力とダイス角 すでに報告したように, 押し出し力はダイス角60°~180°についてはダイス角の影響をうけない。そこで今回は30°ダイスを加えて比較した。その結果を図7に示す。いずれの場合もダイス角30°の場合は押し出し力が著しく高い。このことからダイス・ピレット間は必ずしも液相成分による流体潤滑状態でないことが分る。これらの結果から押し出しには加工が容易な180°ダイスが適当であると云える。

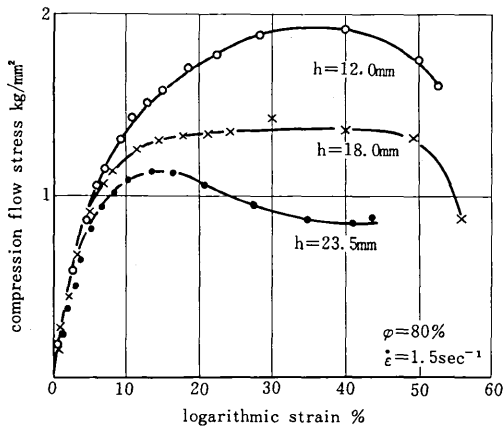
(2) 押し出し力とベアリング長さ 図8にベアリング長さの影響を示す。これによれば固相分率100%の場合



(a)

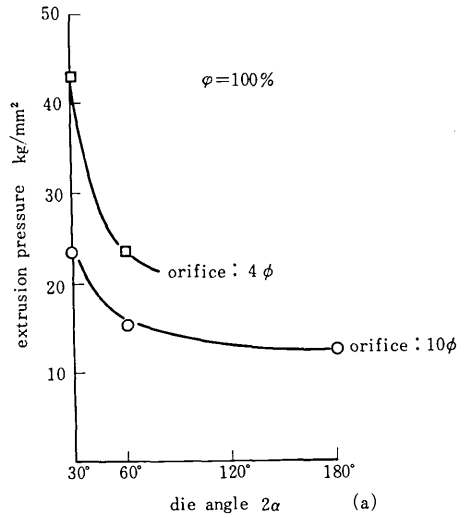


(b)

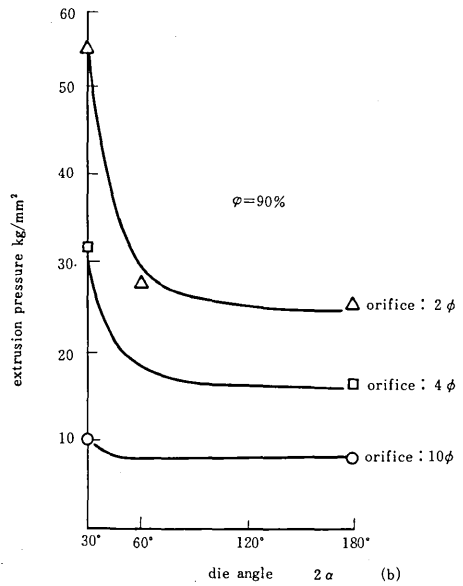


(c)

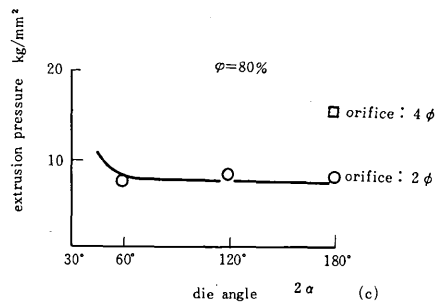
Fig. 6 Stress-strain curves in uniaxial compression tests
----the effect of the dimension of the specimen



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 Extrusion force vs die angle

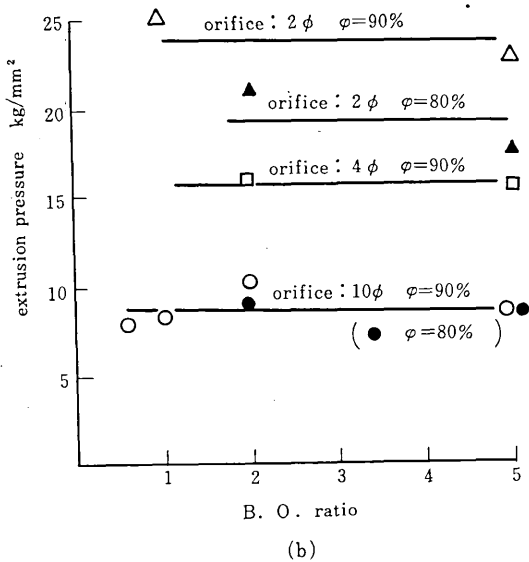
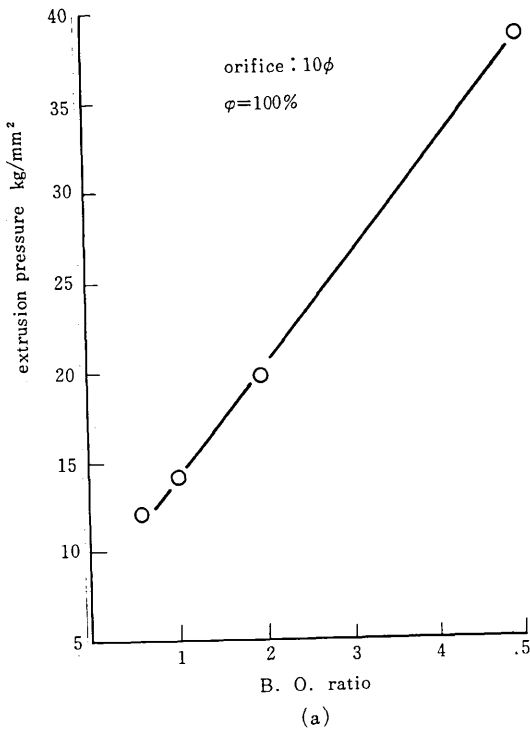


Fig. 8 Extrusion force vs bearing length

はB. O. 比 (ベアリング長さ とダイス穴径の比) に対し押し力が直線的に増加しているが、80%、90%ではB. O. 比の影響はないと云える。固相分率 100%で押し力がベアリング長さとともに増大するのは、基本的には摩擦力によるものと思われるが固相線付近における特殊性が影響している可能性もある。しかしそ

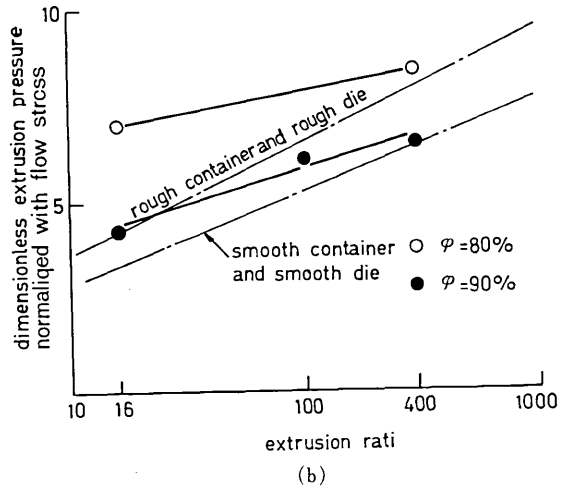
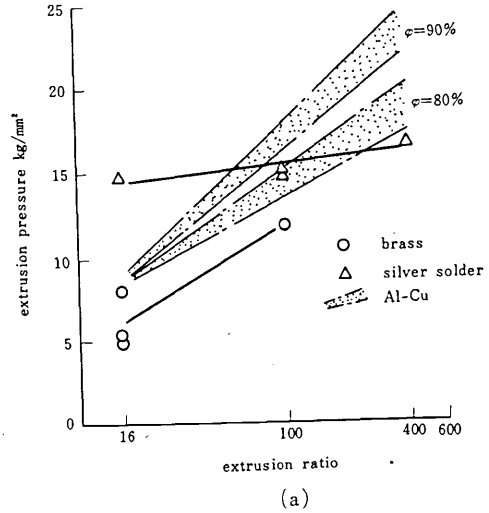


Fig. 9 Extrusion pressure vs extrusion ratio

れが何であるかは明らかでない。また固相分率90%、80%でB. O. 比の影響がほとんどないのは凝固収縮あるいは液相成分のしみ出しによる潤滑効果によるものと考えられる。

(3) 押し力と押し比 図9(a)に押し比の影響を示す。これを圧縮変形抵抗で無次元化した結果が図9(b)である。図9(b)中の鎖線は工藤らのすべり線場による解析解を示す。固相分率80%の場合範囲外に出ているのは圧縮試験の場合と押し実験の場合とで材料の流動挙動が異なりそれによって変形抵抗の評価にちがいがあつたためと考えられる。固相分率90%の場合は大体すべり線場解析のシミュレーションが可能な範囲に入っており、変形流動条件が圧縮と押しで余り差がないものと見られる。

図9(a)中の△と○はそれぞれ銀ろう、黄銅の結果を示している。両合金とも高融点であること、凝固温度

範囲がせまいことなどによって固相分率の断定は難しいが、図で見る限り主として固相分率90%以下と推定される。

(4) 管の押出し アルミ-銅合金の外径10φ肉厚1mm, 0.5mmについて実験を行い, ベアリング長さ10mmで1t, 4mmで0.5tのものが健全に押出された。押出し力と押出し比の関係を示した結果を図10に示す。図中の破線で囲まれた領域は棒材の場合の結果を示しており, この場合は管材の押出し力の方がやや低めに現れている。管材においては, 同一押出し比でも製品形状は異なり, したがって流動様式は同一とは限らないから他の形状の場合は逆に高めになる場合もありうる。

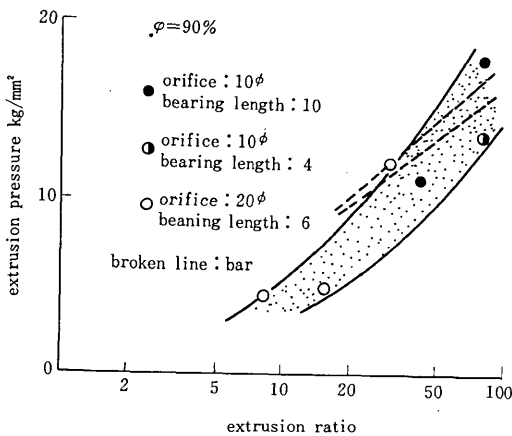


Fig.10 Extrusion pressure vs extrusion ratio

- (5) 製品品質 アルミ-銅合金棒材製品品質と押出し条件の関係は次の通りであった。
- 1) 固相分率の高いものほど健全な製品がえられ易い。
 - 2) B. O. 比の大きいものほど健全な製品がえられやすい。
 - 3) B. O. 比0の場合はほとんどが不良であったが, ダイス角の小さい方がやや良い製品がえられる。
 - 4) 固相分率が100%の場合と90, 80%の場合ではやや傾向がちがうが, いずれの場合もB. O. 比2以上であれば大体健全な製品がえられる。
 - 5) 製品強度は, 10φ健全材について引張試験を行った結果, 引張つよさ21~25kg/mm²とピレットの11kg/mm²にくらべて2倍ていどとなった。伸びは約15%あった。
- B. O. 比が大きいほど欠陥が生じにくい原因については次のように考えられる。B. O. 比0の場合, 引張

つよさが極めて低い固液共存状態では図11の破線で示したすべり線に沿って容易に欠陥が生じることになる。ところがB. O. 比が大きくなるとベアリング壁との摩擦(実際には凝固収縮, 熱収縮あるいは液相成分の潤滑効果のためごくわずかである)による逆圧力が生じこれによって欠陥の発生が防止される。

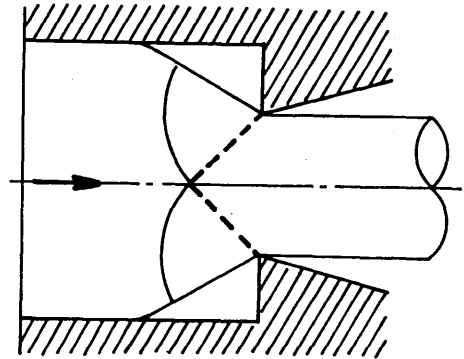


Fig.11 Slip line field in extrusion

4. 結 論

アルミ-銅合金の圧縮試験およびアルミ-銅, 黄銅, 銀ろうの押出し実験から次のような結論をえた。

- 1) 広い範囲にわたるひずみ速度について固相分率と変形抵抗の関係が明らかになった。
- 2) 変形抵抗に対する寸法結果が明らかにされた。
- 3) 半溶融状態における金属の変形機構について考察した。
- 4) 棒材の押出しではアルミ-銅および銀ろうで減面率99.6%, 黄銅で99%までの加工が可能だった。
- 5) 管材の押出しではアルミ-銅合金について98.7%の減面率までの加工が可能であった。
- 6) 製品は, 固相分率が高い場合およびB. O. 比が大きい場合に健全であった。

5. おわりに

この研究は東京大学生産技術研究所第2部木内研究室において行われたものである。

研究を遂行する上で終始御指導いただいた東京大学生産技術研究所教授鈴木弘先生に深く感謝の意を表したい。

(1975年5月6日受理)

参考文献

- 1) 工藤 英明: 日本機械学会誌67 (1964) 392